

## 光纤尾纤波分复用滤光膜的研制

高晓丹

(武汉东湖学院 电子信息工程学院,湖北 武汉 430212)

**摘要:** 根据光纤通信无源器件对光学薄膜的特殊需求,要求在光纤尾纤上镀制较复杂的波分复用滤光膜,针对光纤镀膜所存在的难点问题,利用 TFCalc 膜系设计软件采用解析法设计出一个初始的规整膜系,再结合梯度优化法在该规整膜系上有选择性的局部优化,并考虑镀膜设备所允许的膜层灵敏度,评估其鲁棒性和可镀制性,从而设计出满足光谱特性要求的滤光膜膜系。然后通过对德国莱宝 APS1104 型镀膜机进行内部结构改造并选择合适的冷镀工艺,最终采用离子源辅助沉积对所设计的膜系进行了实际镀制,获得了性能优良的光纤尾纤波分复用滤光膜。

**关键词:** 波分复用滤光膜; 光纤尾纤; 膜系; 镀制工艺

**中图分类号:** O484.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0955-04

## Wavelength division multiplexing filter coating on optical fiber pigtail

Gao Xiaodan

(Electronic Information Engineering College, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China)

**Abstract:** According to the especial requirement for optical coating in fiber communication passive devices, complicated wavelength division multiplexing(WDM) filter coating was demanded on optical fiber pigtail, in view of the difficulty about the coating deposition on optical fiber pigtail, an initial quarter film was given by resolution method by using TFCalc formula design software, then gradient optimization method was combined to partly optimize the initial formula, and the layer sensitivity of the formula was analysed by combining deposition equipment to assess the robustness and the deposition feasibility, then the formula of wavelength division multiplexing(WDM) filter coating on optical fiber pigtail was obtained with good spectral properties. The internal structure and deposition technology of LEYBOLD APS1104 deposition machine made in Germany was improved to deposit the designed formula by using ion assistant deposition with low temperature, the wavelength division multiplexing filter coating on the optical fiber pigtail with good performance was acquired.

**Key words:** wavelength division multiplexing filter coating; optical fiber pigtail; formula; deposition technology

## 0 引言

单纤三向技术在无源光网络的光接入网中是实现音频、视频、数据集成传输的主要技术之一<sup>[1]</sup>。无源光接入网的下行分别采用 1 490 nm 和 1 550 nm 波长的传输窗口承载数据信号和有线电视模拟信号；而上行采用 1 310 nm 波长的窗口，因此无源光网络需要波分复用器对这三个传输窗口的波长进行分波和合波<sup>[2]</sup>。光学薄膜滤光片用来实现无源光网络的波分复用，插入损耗较大，成本较高。随着光通信技术的发展，要求直接在光纤尾纤上镀制波分复用滤光膜。在尾纤上镀制较多层数的滤光膜以满足波分复用特性，对膜系设计及其镀制工艺技术等提出了较高的要求。

首先，光纤尾纤比较纤细，众多尾纤在镀膜机中固定需要设计专门的夹具；其次，尾纤截面为 8° 角的倾斜面，需要特别考虑其在镀制过程中的膜厚均匀性；最后，光纤及环氧树脂不耐高温，超过 100 °C 就会脱皮<sup>[3]</sup>，所以在镀制过程中需要采取冷镀措施，而冷镀对于膜厚均匀性和膜料蒸发的稳定性又是一个大的挑战，并且波分复用滤光膜的层数一般较多，既要控制镀制温度，又要保证膜厚的均匀性和膜料的稳定性，对膜系设计和镀膜工艺都提出了较高要求。

## 1 光纤尾纤波分复用滤光膜的设计

光纤尾纤波分复用滤光膜(R1310/T1490/R1550)的参数要求如下：1 475~1 502 nm 为通带，1 255~1 365 nm 和 1 547~1 565 nm 为反射带，要求通带高透射，通带插入损耗小于 0.2 dB，反射带高度截止，具有 40 dB 以上的通带隔离度。

针对上述要求，通常采用 2 种基本对称周期(0.5HL0.5H)和(0.5LH0.5L)设计膜系<sup>[4]</sup>，但是，对称周期的等效折射率如果不能与周围介质匹配的时候，就容易产生较大的通带波纹<sup>[5]</sup>，因此选择合适的匹配层在膜系设计中就非常重要，但工作量较大，而且很难达到理想的隔离度。虽然对称周期的膜系设计方法存在这些弊端，但是基于光纤尾纤冷镀的需求，为了更好的保证尾纤上 8° 角倾斜面的膜厚均匀性，这种具有对称周期的规整膜系依然是最佳的选择。

因此该膜系设计主要采用解析法设计膜系，解

析法采用规整膜系，工艺上易实现，但光谱性能略差。为了满足光学薄膜的理化性能需求， $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  被选作膜料设计膜系， $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (折射率  $n_H=2.175$ ) 作为高折射率膜料， $\text{SiO}_2$  (折射率  $n_L=1.465$ ) 作为低折射率膜料。由于光纤尾纤端面是 8° 角倾斜面，所以在膜系设计时可考虑入射光线的入射角为 8°，选择参考波长为 1 476 nm，运用 TFCalc 膜系设计软件设计初始对称周期膜系如下：

$$\text{SUB}|(\text{HL})^1\text{H2LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H4LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H4LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H2LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H2LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H4LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H4LH}(\text{LH})^1\text{L}(\text{HL})^1\text{H2LH}(\text{LH})^1\text{L}| \text{Air}$$

所设计初始膜系的透过率曲线如图 1 中曲线 1 所示，由曲线 1 可知，初始膜系的通带最大插入损耗为 0.3 dB，两边的透射隔离度分别为 67 dB 和 40 dB，由此可见，该初始膜系具有较高的通带隔离度，截止度非常高，但通带插入损耗明显过大，如果实际镀制，其插入损耗肯定不满足实际应用需求，为此，需要对该规整膜系进行适当优化处理。

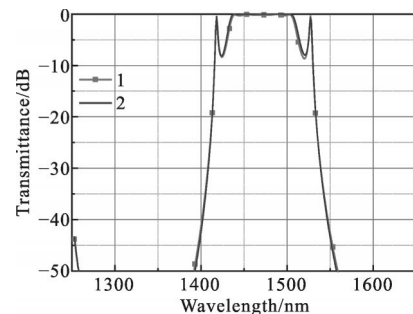


图 1 初始膜系与设计膜系的透过率曲线

Fig.1 Transmittance curves of the initial formula and the designed formula

为了尽可能的保持设计膜系的规整性，采用梯度优化法仅对最后两层膜进行优化处理，该优化方法是通过改变膜层厚度或相关参数使所建立的评价函数最小化或导数为零进行最佳优化选择。经过优化计算分析，最终设计出一个 64 层的膜系，其最后两层膜的光学厚度分别为 0.741 7 H, 0.665 5 L，其余膜层依然为规整膜层，最终所设计膜系的光谱曲线如图 1 曲线 2 所示。为了观察隔离度，图 1 中初始膜系(曲线 1)和设计膜系(曲线 2)的光谱曲线看不出明显的区别，为了便于观察对比，将图 1 中两条光谱曲线

通带顶部放大,如图 2 所示,优化后的光谱曲线 2 在通带插入损耗减小很多,最大插入损耗为 0.02 dB,根据实际镀制经验,完全可以满足设计要求。

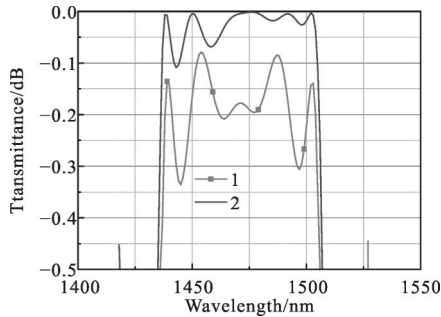


图 2 初始膜系及设计膜系局部放大的透过率曲线

Fig.2 Blown-up transmittance curves of the former formula and the designed formula

### 2 设计膜系的膜层灵敏度分析

虽然设计膜系光谱特性较好,但由于镀膜设备控制精度的限制以及其它因素的影响,使得实际镀制薄膜的透过率曲线与理论设计通常有一定的偏差,因此,设计膜系的膜层灵敏度分析非常有必要,膜层灵敏度的分析可以确定每一层膜对生产误差的灵敏度,灵敏度越低,镀制过程中的随机误差对最后成膜的特性影响就越小。图 3 为设计膜系的膜层灵敏度,由图可见,前 62 层膜的一阶、二阶灵敏度均为零,后两层膜为非规整膜层,灵敏度也比较低,镀制过程中的误差非常小,比较容易控制,从而可以较好的实现其所要求的光谱特性。

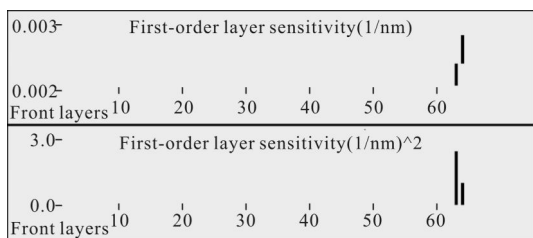


图 3 设计膜系的膜层灵敏度

Fig.3 Layer sensitivity of the designed formula

### 3 光纤尾纤波分复用滤光膜的镀制

光学薄膜能否镀制成功,仅仅依靠一个好的设计膜系是不够的,镀膜机的控制精度和镀制工艺是与设计膜系相辅相成的另外两个方面,三者缺一不

可<sup>[6]</sup>。

光纤尾纤镀膜首先需要根据镀膜机的实际情况设计出合适的夹具以固定尾纤,该夹具在设计上要充分保证镀膜端面的膜厚均匀性,并且光纤在夹具中应呈无应力状态密封。德国莱宝 APS1104 型镀膜机采用透射式光学监控,在中心夹具的平面圆盘  $\phi 100\text{ mm}$  范围内具有较好的膜厚均匀性,曾经有蒸镀 100 多层密集波分复用(DWDM)滤光片的经验,所以在中心夹具的法兰盘上加工出高精度的光纤头插孔,将光纤头固定在插孔中间,其蒸镀面为同一平面。

在进行光纤镀膜过程中,需要特别注意的一项工艺是光纤的温度控制。众所周知,温度会影响膜层结构、凝聚系数、膨胀系数、聚集密度和晶体生长等<sup>[7]</sup>。光纤如果带有环氧树脂或塑料外包层,通常是不能置于高温环境中,只能考虑冷镀,而蒸镀腔内电子枪扫描和离子源辉光放电会提升腔内温度,所以蒸镀过程必须严格控制镀膜机内温度。经多次实验确定工艺参数,镀膜机内加热温度设置为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,考虑离子源和电子枪的热影响,蒸镀温度控制在  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。蒸镀过程中采用等离子体辅助沉积系统,既可以清洁光纤端面,减少应力的影响,增强薄膜的吸附力<sup>[8]</sup>,又可以提高材料折射率的稳定性和膜层的致密性。

蒸镀材料  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  选择的是纯度为 99.99% 的膜料,为了配合冷镀,镀膜前膜料的靶材预熔是一项重要的工艺,目的是为了稳定膜料的折射率,并提高膜层的致密度。

采用德国莱宝 APS1104 型真空镀膜机对所设计的膜系进行实际镀制时,OMS3000 光学监控系统 and QSM 石英晶体振荡膜厚控制系统实时监控薄膜的沉积,电子枪 ESQ-14 和 ESV-212 分别蒸发高、低折射率材料  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$ ,设计膜系的前 62 层为规整膜系,主要采用光学监控方式,蒸镀误差较小,后两层非规整膜系光控和晶控结合,尽可能减小蒸镀误差。镀制时,镀膜机真空腔先抽真空到  $1 \times 10^{-6}\text{ Pa}$ ,然后加热镀件到  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高、低折射率膜料  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  的蒸发速率分别设置为  $0.55\text{ nm/s}$  和  $1.2\text{ nm/s}$ ,对离子源的参数进行严格控制,以确保冷镀。

蒸镀完成后,采用 Agilent 公司生产的 86142B 型光谱分析仪进行测试。图 4 为测试的透射率光谱曲线与设计光谱曲线的对比,其中实线为测试的透

射率光谱曲线,虚线为设计膜系的透射率光谱曲线。可见,该测试曲线在通带范围(1 475~1 502 nm)内最大插入损耗为 0.15 dB,反射带(1 255~1 365 nm, 1 547~1 565 nm)高度截止,通带隔离度 42 dB。对比发现实际淀积后的测试光谱曲线与设计曲线具有较好的重合性,只是由于实验条件的限制,测试仪器的光源的波长范围只有 1 310/1 490/1 550±50 nm,所以在 1 350~1 400 nm 波段由于没有光源而呈现为明显的纹波,但对测试结果影响不大,从测试数据来看,依然满足实际应用的需求。

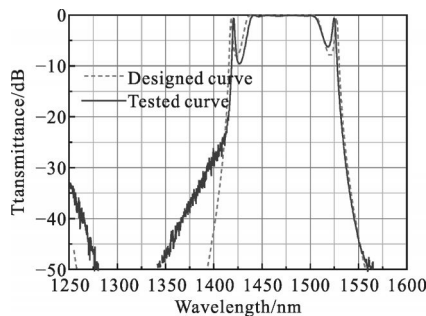


图 4 成膜的透过率测试曲线与设计曲线

Fig.4 Tested curves of the deposited coating and the designed curve

## 4 结 论

基于光通信在光纤尾纤上镀制波分复用滤光膜的需求,考虑到光纤尾纤镀膜存在的难点问题,论文以  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  为介质材料,综合解析法和梯度优化法设计出光纤尾纤波分复用滤光膜的膜系,结合德国莱宝 APS1104 型镀膜机分析了设计膜系的膜层灵敏度和可镀制性,并针对镀膜机的特点,对其内部结构进行改造,并制订合适的镀制工艺,从而实际镀制出具有较好光谱特性的波分复用滤光膜。

## 参考文献:

- [1] Gao Xiaodan, Ge Weilong. Manufacture of interference edge filter for FTTH triplexer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1508-1511. (in Chinese)  
高晓丹, 葛卫龙. 光纤到户单纤三向截止滤光片的研制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1508-1511.
- [2] Jiang Shaoji, Zhang Fuguang, Liu Yan, et al. Manufacture of depolarization cut-off filter for passive optical network triplex play [J]. *Optical Technique*, 2005, 31 (4): 548-550. (in Chinese)  
江绍基, 张甫光, 刘艳, 等. 无源光接入网单纤三向消偏振截止滤光片的研制[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 548-550.
- [3] Gao Xiaodan, Wei Chun. Manufacture of interference edge filter film on the end of fiber for optical communication[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 314-316. (in Chinese)  
高晓丹, 魏纯. 光通信用光纤端面截止滤光膜的研制[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 314-316.
- [4] Tang Jinfa, Gu Peifu. *Optical Film Theory and Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1989: 126-135. (in Chinese)  
唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 126-135.
- [5] Zhou Jiulin, Yin Shubai (translating). *Optical Coating Technique*[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1974: 257-270. (in Chinese)  
周九林, 尹树百译. 光学薄膜技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1974: 257-270.
- [6] Gao Xiaodan. Design and manufacture of non-polarizing light-splitting film with 7 to 3 in a wide spectral range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (5): 1302-1305. (in Chinese)  
高晓丹. 宽波段 7:3 消偏振分光膜的设计及镀制 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1302-1305.
- [7] Huang Hongliang, Cheng Shuying, Huang Bihua. Influence of substrate temperature on properties of ZnS films prepared by electron beam evaporation [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, 20(3): 355-358. (in Chinese)  
黄红梁, 程树英, 黄碧华. 基片温度对电子束蒸发的 ZnS 薄膜性能的影响[J]. 光电子·激光, 2009, 20(3): 355-358.
- [8] Wang Li, Cheng Xinbin, Wang Zhanshan, et al. IAD process for optical coating application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 896-898. (in Chinese)  
王利, 程鑫彬, 王占山, 等. 离子束辅助沉积薄膜工艺[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 896-898.